

Aus dem Strahleninstitut/-Klinik der
Freien Universität Berlin im Städt. Krankenhaus Westend
Direktor: Professor Dr. med. Heinz Oeser

DIE GRENZE DES RÖNTGENOLOGISCHEN NACHWEISES
VON ENTKALKUNGSPROZESSEN IM SKELETT

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung der medizinischen Doktorwürde

an der

Medizinischen Fakultät der Freien Universität Berlin

vorgelegt von

Gisela von Leitner geb. Steffens

aus Berlin

1969



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aus dem Strahleninstitut/- Klinik der Freien Universität Berlin
im Städt. Krankenhaus Westend

Direktor: Professor Dr. med. Heinz O e s e r

Die Grenze des röntgenologischen Nachweises
von Entkalkungsprozessen im Skelett.

Inaugural - Dissertation

zur

Erlangung der medizinischen Doktorwürde

an der

Medizinischen Fakultät der Freien Universität Berlin

vorgelegt von

Gisela von Leitner geb. Steffens

aus Berlin

Dekan: Professor Dr. med. Hans Heinz Naumann

Referent: Professor Dr. med. Dr. rer. nat. Ernst Krokowski

Korreferent: Professor Dr. med. Heinz Oeser



Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Freien Universität Berlin.

Promoviert am: 11. Februar 1969

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

- I Einleitung
- II Wie kann eine Osteoporose diagnostiziert werden?
 - 1. Klinische Symptome
 - 2. Visuelle Beurteilung des Röntgenbildes
 - 3. Knochenbiopsie
 - 4. Stoffwechselbilanzuntersuchungen
 - 5. Akustische Analyse
 - 6. Radiologische Methoden zur quantitativen Messung des Knochenmineralgehaltes
 - a. vergleichende Schwärzungsmessung mit Hilfe von Röntgenstrahlen
 - b. quantitative Absorptionsmessung
 - c. Substanzanalyse mit differenten Strahlenqualitäten
- III Kenntnisse über die Korrelation zwischen der röntgenologisch nachweisbaren Osteoporose zum Mineralgehalt.
- IV Eigene Untersuchungen
 - 1. Methode
 - 2. Ergebnisse
- V Diskussion
 - 1. Deutung der Versuchsergebnisse
 - 2. Bedeutung für die Klinik
 - 3. Folgerung für die speziellen radiologischen Untersuchungsmethoden
- VI Zusammenfassung
- VII Literaturangaben
- VIII Danksagung
- IX Lebenslauf

I EINLEITUNG

Der Röntgenologe stützt sich bei der Abschätzung des Schweregrades einer Osteoporose auf die Untersuchungen von Léon Babaiantz (1949), der die ersten Zeichen einer Osteoporose bei einem Mineralverlust von ungefähr 30% feststellen konnte. Aufgabe dieser Arbeit ist es, seine Ergebnisse, die seit zwei Jahrzehnten als Grundlage in der visuellen Röntgendiagnostik zur Bewertung des Knochenmineralgehaltes dienen, in modifizierter und erweiterter Form zu überprüfen.

Dem klinischen und radiologischen Erscheinungsbild der Osteoporose wurde in den letzten Jahren gesteigerte Aufmerksamkeit geschenkt, da die Bedeutung des Knochens als wichtigster Regulator im Mineralstoffwechsel erkannt wurde (1) und die Osteoporose infolge der höheren Lebenserwartung in ihrer physiologischen Form im Rahmen der Altersinvolution immer häufiger in Erscheinung tritt, aber auch als Begleiterscheinung anderer Krankheiten und nach der heute recht vielfältig angewandten Corticoidmedikation besondere Bedeutung erlangte und somit ernste therapeutische Probleme aufwarf.

Die Osteoporose stellt die Reaktionsform des Knochens auf bestimmte Störungen, die die Resorption, Verwertung und / oder Ausscheidung von Knochenbaustoffen beeinflussen, dar (2). In einer Reihe von Arbeiten konnte bewiesen werden, daß pathogenetisch in vielen Fällen ein erhöhter Knochenumsatz mit gesteigertem Knochenabbau vorliege (3, 4, 5). Nach dieser Auffassung wäre die Osteoporose das Ergebnis einer reparativen Regulationsstörung. Neumann (6) vermutet als Ursache einen über längere Zeit andauernden endogenen Kalziummangel, d.h. eine Tendenz zum Abfall des Blutkalziumspiegels, die aber klinisch nicht zu erfassen sei wegen der sehr empfindlich regulierten Homöostase des Blutkalziumwertes. Kalziumarme Kost, Darmresorptionsstörungen, renale Kalziumverluste und Corticoidtherapie könnten nach dieser Vorstellung einen endogenen Kalziummangel herbeiführen (6, 7). Die Ursachen des vermehr-

ten Knochenabbaus stellen sich Schwarz und Heany (8, 9) als Ergebnis eines nicht faßbaren sekundären Hyperparathyreoidismus vor, der die Homöostase des Blutkalziums gewährleistet.

Sowohl durch Kalzium-Bilanzuntersuchungen (10) als auch mit der Methode der röntgenologischen Substanzanalyse konnten verschiedene Phasen der Osteoporose festgestellt werden (11):

1. Eine frühe Phase der Demineralisation: sie erstreckt sich im Mittel nur über zwei Jahre. Anbau und Abbau von Knochensubstanz sind gesteigert, der Abbau überwiegt jedoch. Alkalische Phosphatase und Phosphat im Serum sind oft erhöht, eine Hyperkalziurie feststellbar. Die Skelettkalziumretention ist entsprechend der gesteigerten Osteoblastentätigkeit erhöht. In dieser Zeit liegt also neben einer quantitativen Volumenatrophie des Knochens auch eine qualitative Veränderung im Sinne einer Demineralisation vor.
2. Eine Endphase: die atrophische Osteoporose. Die Serumwerte sind normal, die Kalziumretention findet nicht mehr statt, die Fähigkeit zur spontanen Remineralisation ist verloren.

In dieser Endphase haben bisher therapeutische Maßnahmen zu keinem eindeutigen Erfolg führen können, weder Kalziumgaben über längere Zeit (12) noch Anabolika (13) hatten einen nachweisbaren Effekt auf den Knochenumsatz. Der Grund hierfür liegt wahrscheinlich darin, daß die Diagnose meistens erst in der zweiten Phase gestellt wird, in der der Knochen auf diese Maßnahmen nicht mehr reagieren kann.

Es ist also eminent wichtig, die Diagnose einer Osteoporose in der Frühphase zu stellen, in der der Knochen trotz eines relativ schnellen Mineralverlustes das Kalzium noch binden kann, damit eine Therapie Aussicht auf Erfolg hat.

II WIE KANN EINE OSTEOPOROSE DIAGNOSTIZIERT WERDEN ?

Sehr unzuverlässig sind die beiden folgenden Methoden, da sie auf subjektiven Kriterien beruhen. Auf ihre Anwendung beschränkt man sich heute noch größtenteils..

1. Klinische Symptome

Der sogenannte Skelettschmerz gilt als führendes Symptom. Krokowski (14) konnte durch Vergleich von subjektiven Schmerzangaben und objektiv festgestellter Höhe des Mineralgehaltes des Skeletts an einem großen Krankengut keine direkte Beziehung hinsichtlich Schweregrad, Lokalisation und Altersverteilung finden. Er mußte die Osteoporose als generelle Ursache der Schmerzen ausschließen. Erst bei stark ausgeprägter Osteoporose findet man auch äußerlich eindeutige Veränderungen: durch die Bildung von Platt-, Keil- oder Fischwirbeln, die schließlich zusammenbrechen, werden die Patienten im Rumpf kürzer, oft bildet sich eine quere Falte am Oberbauch. Die Extremitäten behalten ihre Länge. In diesen Fällen sind durch die begleitenden Nervenirritationen oder durch Zerrungen am Periost Schmerzen verständlich. Serologisch finden sich selten Veränderungen.

2. Visuelle Beurteilung des Röntgenbildes

Der Arzt schätzt die Knochenmineralisation aus der Schwärzung des Röntgenbildes bzw. der Stärke der Strahlenabsorption des Knochens, seiner Struktur und seiner Form. Diese Aussage hängt also vom Ermessen und der Erfahrung des Beurteilenden einerseits, von den physikalischen Absorptionsverhältnissen andererseits ab. Weitere Fehlerquellen sind Lagevariationen und Filmqualitäten. Eine zunehmende Knochentransparenz ergibt sich bei härteren Strahlen oder starkem Weichteilmantel. An Hand des Röntgenbildes können auch erfahrene Röntgenologen nur sehr vage Vermutungen über den Grad der Osteoporose anstellen, eine exakte Aussage ist praktisch nicht möglich.

Es wurden eine Reihe von gezielten Methoden ausgearbeitet, die zur Objektivierung der Diagnose einer Osteoporose beitragen sollten.

3. Knochenbiopsie

Sie wird meist aus der Crista iliaca oder der Tibiakante entnommen und ergibt in der histologischen Untersuchung (mit Kalzium-Anfärbung) ein genaues Bild des Knochens, allerdings nur zweidimensional. Eindeutige Nachteile sind, daß die Probe nicht den Zustand des ganzen Skeletts widerspiegelt, und daß man die Biopsie zur Verlaufsbeobachtung nicht beliebig oft wiederholen kann.

Einen größeren Aussagewert schuf die Erweiterung dieser Methode durch Tetracyclin-Gaben, angegeben von Milch und Mitarbeitern 1957, übernommen von Urist 1961 (15). Kurze Zeit vor der Biopsie nimmt der Patient oral Tetracycline, die von den "aktiven Osteonen" konzentrisch in der neugebildeten Knochensubstanz abgelagert werden. Im histologischen Präparat werden sie im UV-Licht durch Fluoreszenz sichtbar und geben ein ungefähres Bild über die Stoffwechselaktivität des Knochens.

4. Stoffwechselbilanzuntersuchungen

Dieser Weg erwies sich für diese Frage als unzureichend, da man feststellen mußte, daß die Kalzium-, Stickstoff- oder Phosphorbilanzen in keiner direkten Beziehung zu den Vorgängen im Knochen stehen (Kuhlencordt, 16). Geyer (17) nahm an, aus kombinierten Kalzium-Stickstoffbilanzuntersuchungen die Menge des neueingebauten Minerals in dem für den Knochen typischen Verhältnis von 4N zu 35000 Ca berechnen zu können. Aber er fand, daß nach Gabe von Anabolika Phosphor und Kalzium im Verhältnis ihrer Plasmakonzentration retiniert wurden.

Haas (18) und Hesch (19) konnten zwar Angaben über die sogenannte "Skelettkalziumretention" machen, auf deren Maß sie nach i.v. Gabe von Kalzium aus der Höhe der Hyperkal-

ziurie schlossen und diesen Wert mit dem von gesunden Personen unter denselben Versuchsbedingungen verglichen. Relative Veränderungen infolge gleichzeitiger Volumenatrophie berechnete Hesch nach einer von ihm angegebenen Formel, in der die (bioptisch geprüfte) Spongiosararefizierung berücksichtigt war. Diese "Skelettkalziumretention" wurde durch die erhöhte Kalziumbindungsfähigkeit des untermineralisierten Knochens erklärt. Bis jetzt konnte nicht der Beweis erbracht werden, daß ein Überangebot von Kalzium, das schnell im Körper aufgenommen wird, wirklich im Knochen eingelagert wird. Bürger (20) fand bei der morphologisch-histologischen Untersuchung von alterndem Gewebe, daß das Skelett zwar infolge des langsamen Erlöschens der germinativen Fähigkeit der Osteoblasten 20% und mehr seines Mineralgehaltes verliere, dieses Kalzium aber durch "Transmineralisation" in bradytrophem Gewebe wie Knorpel und Disci intervertebrales abgelagert werde. Der Körper verliert also total gesehen nur wenig Kalzium. Das bedeutet, daß das Serum-Kalzium nicht nur zum Knochenstoffwechsel, sondern auch zum bradytrophem Gewebe in Beziehung steht. Brauchbare Methoden zur Bestimmung des Mineralgehaltes im Knochen müssen also am Knochen selbst ansetzen.

5. Akustische Analyse

Bartelheimer und Freyschmidt (21) entwickelten die Methode der akustischen Analyse des Perkussionsschalls eines oberflächlich gelegenen Knochens, z.B. der Tibia. Ein Körperschallmikrophon überträgt die Schallwellen auf ein endloses Tonband. Unterschiedliche Frequenzspektren, die vom Mineralgehalt und der Struktur des Knochens abhängig sind, ermöglichen es, die Diagnose einer Osteoporose zu stellen.

6. Radiologische Methoden zur quantitativen Messung des Knochenmineralgehaltes.

- a. Vergleichende Schwärzungsmessung mit Hilfe von Röntgenstrahlen. Auf dem Röntgenbild wird der zu untersuchende Skelettabschnitt zusammen mit einem Bezugssystem aufgenommen, danach werden photometrisch Orte identischer Schattengebung von Knochen und Phantom bestimmt. Dieses Phantom hat die Form einer Treppe

oder eines Keils, um eine Skala verschiedener Schwärzungen zu liefern, und besteht aus einem Material, das sich in der Röntgenstrahlenabsorption dem Knochen ähnlich verhalten soll.

Engström und Welin (22) wählten bei Untersuchungen an den Handphalangen eine Aluminiumtreppe.

Mack und Mitarbeiter (23) arbeiteten mit einem Elfenbeinkeil und entwickelten eine mikrophotometrische Aufzeichnungsmethode, mit der sie die "Mineraldichte" entlang eines Knochenquerschnittes aufzeichnen konnten. Auch sie untersuchten am Handskelett, wo der störende Weichteilfaktor sehr klein ist, und versuchten ihn rechnerisch zu eliminieren.

Jackson (24), dessen Phantom ein Ochsenknochen war, versuchte den Streueffekt durch die Weichteile zu standardisieren, indem er den zu untersuchenden Skelettabschnitt in eine Wasserwanne legte.

Diesem Beispiel folgten Balz und Birkner (25), die auch die Aluminiumtreppe in ein eigenes Wassergefäß legten und die Berechnung der Knochenmineralisation über den Aluminium - schwächungsgleichwert (die Schwärzung einer bestimmten Stelle am Knochen wird auf dem Phantom aufgesucht) angaben. $1 \text{ mm Al} = 130 \text{ mg/ cm}^2 \text{ Knochenmineral}$.

Keane/ Spiegler / Davis (26) untersuchten den Mineralgehalt der Ulna, wobei sie den Unterarm dicht neben eine Aluminiumtreppe in einen Wassertank legten.

Heuck und Schmidt (27) ließen hydroxylapatit in Form kleinster Körnchen in Kunstharz einpolymerisieren und hatten damit ein Bezugssystem, dessen Material dem Knochen am ähnlichsten war. Das Phantom legten sie unmittelbar neben das Skeletteil unter den umgebenden Weichteil (Oberschenkel) , ein Spezialtubus komprimiert diesen, damit Knochen und Treppe von einem gleich starken Weichteilmantel umgeben werden.

Die Methode der vergleichenden Schwärzungsmessung führt bei exakter Ausführung zu brauchbaren Ergebnissen, sie hat aber den großen Nachteil, daß sie nicht zur Messung an der Wir-

belsäule herangezogen werden kann. Da die pathologische Osteoporose aber fast stets zentrifugal verläuft, muß man zu ihrer Früherkennung ein Verfahren verwenden, mit dem man den Mineralgehalt jedes beliebigen Knochens unabhängig von dessen Lage im Körper feststellen kann.

b. Quantitative Absorptionsmessung

Die Absorption von Röntgenstrahlen wird direkt mit einem Dosimeter, z.B. Szintillationszähler, gemessen, wobei die Fehlerquellen, die durch den Röntgenfilm, die Aufnahmetechnik und Entwicklung entstehen können, entfallen. Der Quotient aus Röntgenstrahlenabsorption Knochen : Luft ergibt den Transmissionsfaktor zur Berechnung des Schwächungskoeffizienten.

Vose (28) und Györgyi / Bozoki (29) benutzten diese Meßtechnik am distalen Femurkondylus.

Monochromatisches Licht für dieses Verfahren wählten Frommhold und Schoknecht (30), und zwar die k-Strahlen von Molybdän mit $\lambda = 71 \text{ \AA}$ bei einer Röhrenspannung von 17kV, ebenso Cameron / Grant / MacGregor (31), die mit J^{125} bei 28,5 kV arbeiteten. Damit wollten sie eine Aufhärtung der Strahlung durch Streustrahlung, wie sie bei dem normalen Spektrum der Röntgenstrahlen auftritt, weitgehend verhindern. Diese Aufhärtung bedeutet eine Änderung des Absorptionskoeffizienten mit zunehmender Dicke des Knochens. Der zu untersuchende Finger wird gleichmäßig durch einen (Röntgen-) strahl geführt und dabei eine Absorptionskurve geschrieben, die eine Aussage über den Mineralgehalt und über die Feinstruktur erlaubt.

Die oben beschriebenen Methoden können alle nur an peripheren Skelettabschnitten angewendet werden. Mit der Methode der

c. Quantitativen röntgenologischen Substanzanalyse mittels differenter Strahlenqualitäten

wurde von Krokowski (32) ein Verfahren entwickelt, das eine exakte Bestimmung des Hydroxylapatitgehaltes pro Volumeneinheit untersuchten Knochens erlaubt. Es kann an allen Skelett-

abschnitten angewandt und beliebig wiederholt werden bei einer Fehlerbreite von $\pm 4\%$. Die von ihm an Gesunden ermittelten Normalwerte erlauben, vergleichend eine Aussage über den Schweregrad der Osteoporose zu machen.

Von dem zu untersuchenden Skeletteil werden bei einer Röhrenspannung von 60 kV und 200 kV Röntgenaufnahmen angefertigt. Die Schwärzungen durch Knochen und Weichteil werden direkt neben ihm photometrisch bestimmt. Der Quotient Schwächungsgleichwert SGW 62 kV : SGW 200 kV ist nur noch von der Ordnungszahl und damit vom Hydroxylapatitgehalt abhängig, da die beiden Aufnahmebedingungen gemeinsamen Schwächungsfaktoren Dicke und Dichte eliminiert werden, im Weichstrahlbereich aber die Röntgenstrahlenabsorption auch von der dritten Potenz der Ordnungszahl abhängt. Es wurde ein Rechenschieber entwickelt, der unter Einstellung der Schwärzungsdifferenzen S_1 und S_2 den Gehalt an Hydroxylapatit in mg/ml Knochen angibt und unter Einstellung des Alters des Patienten die graduelle Einstufung von physiologischer und pathologischer Osteoporose erlaubt.

III KENNTNISSE ÜBER DIE KORRELATION ZWISCHEN DER RÖNTGENOLOGISCH NACHWEISBAREN OSTEOPOROSE ZUM MINERALGEGHALT.

Lachman und Whelan (33) verglichen die Röntgenbilder von chemisch entkalkten Knochen mit denen osteomalazischer Knochen und stellten fest, daß das zur röntgenologischen Erkennung erforderliche Ausmaß der Entkalkung beträchtlich variiere zwischen den Knochen verschiedener Skeletteile und zwischen verschiedenen Teilen eines Knochens. Knochen mit viel Spongiosa und relativ dünner Kortikalis zeigten am frühesten röntgenologische Veränderungen während der Entkalkung. Unter sehr günstigen experimentellen Bedingungen seien Unterschiede im Kalkgehalt von ca 7% sichtbar geworden, und zwar bei Serienaufnahmen an demselben Knochen. Lachman und Mitarbeiter fanden, daß in aktuellen klinischen Fällen von Osteoporose erst nach Jahren eine Entkalkung des Skeletts röntgenologisch sichtbar wurde.

Léon Babaiantz berichtete 1948 auf dem "6. elektroradiologischen Kongreß" in Genf (34):

"Das fundamentale gemeinsame Charakteristikum für fast alle Knochenatrophien ist die Zunahme der Transparenz des Knochens für Röntgenstrahlen, wobei es interessant erscheint, ein Maß für die Demineralisation eines Knochens festzustellen, bei welcher die Atrophie auf dem Röntgenbild erscheint.

Das Ziel meiner Untersuchungen war es, nicht mazerierte Knochenstücke mit 0,5%iger Salpetersäure chemisch zu entkalken. Die Versuche wurden an 1cm dicken Scheiben normaler Wirbelkörper gemacht, die eine architektonische Gleichmäßigkeit zeigten. Auf den aufeinanderfolgenden Röntgenaufnahmen dieser Scheiben, die bei fortgesetztem Kalziumentzug in einem Abstand von 24 Stunden angefertigt wurden, zeigten sich bei visueller Beurteilung die ersten Anzeichen einer Entkalkung nach einem Kalkverlust von ungefähr 30%. Sicher können diese Resultate nicht mit Röntgenaufnahmen am lebenden menschlichen Skelett verglichen werden, wenn man die unterschiedlichen Bedingungen wegen der Weichteilmitbeteiligung bedenkt und die verschiedenen anatomischen Substrate, die jedem Typ der Knochenatrophie anhaften. Jedenfalls erlauben diese Ergebnisse, das Ausmaß einer Skelettdemineralisation zu erfassen, wenn sie auf dem Röntgenbild erscheint."

(eigene Übersetzung)

Um über die visuelle Beurteilung einer Schwärzung, die durch Röntgenstrahlenabsorption eines Knochens hervorgerufen wird, zu einer Einschätzung des Knochenmineralgehalts zu gelangen, muß folgende Voraussetzung erfüllt sein: die Strahlenabsorption des Knochens muß proportional seinem Mineralgehalt sein.

Caldwell und Collins (35) verglichen histologisches Bild, Röntgenbild und den Kalziumgehalt aus der Asche von 1cm dicken Wirbelkörperstücken und konnten beweisen, daß sich die Schattengebung im diagnostischen Strahlenbereich auf dem Röntgenbild proportional dem Kalkgehalt verhält (1961).

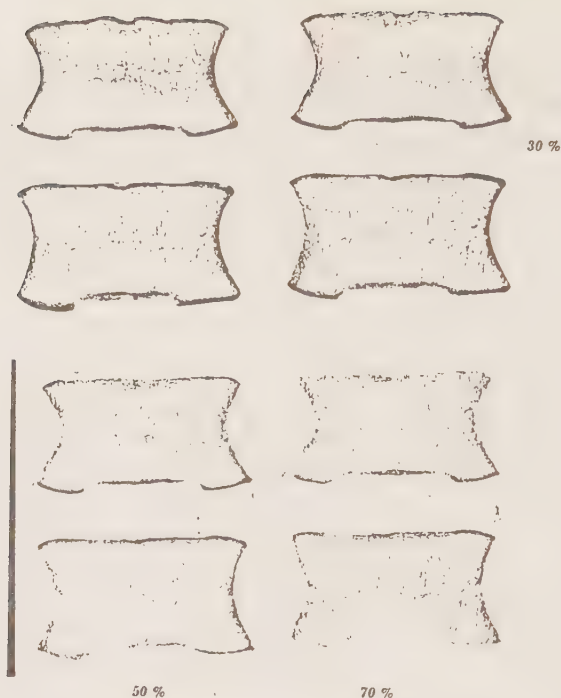


Fig. 2. -- Décalcification chimique ac. nitrique : 0,5 % de corps vertébraux coupés en tranche de 1 cm. d'épaisseur et radiographiés toutes les 24 heures. Les chiffres 30 %, 50 % et 70 % indiquent le taux de la décalcification.

Abb. 1 Originalaufnahmen aus "Les Ostéopathies atrophiques"
von Léon Babaïantz, 1948

IV An die Versuche von Babaïantz werden nun meine eigenen
Untersuchungen anknüpfen.

a. Methode

Vier Brustwirbelkörper (jeweils Th. 10), vier Lendenwirbelkörper (L 2), vier Zylinder aus der Femurdiaphyse, vier Scheiben aus dem Collum femoris und eine Phalanx (Metatarsale II) wurden in 0,5% iger Salpetersäure stufenweise entkalkt und im Abstand von 24 Stunden mit einer im folgenden beschriebenen Meßanordnung geröntgt. Die Auswahl der pathologischen Präparate erfolgte nach dem Alter und Geschlecht und unter Ausschluß lokalisierter Knochenerkrankungen. Die

Knochen wurden von Sehnen und Mark freipräpariert und an Zwirnsfäden befestigt, mit denen sie freischwebend aufgehängt werden konnten. Die Säure wurde alle 24 Stunden erneuert.

Meßanordnung:

Zwei rechteckige Plexiglasgefäße (25cm lang, 15cm breit, 20 cm hoch) wurden nebeneinander auf den Buckytisch gestellt. Beide enthielten Wasser, um dem Weichteilfaktor Rechnung zu tragen bzw. um die visuelle Beurteilung der zunehmenden Knochentransparenz, die an normalen menschlichen Skeletaufnahmen geschult ist, zu erleichtern. In das eine Gefäß wurden die Knochen in die halbe Höhe der 16 cm hohen Wasserschicht gehängt, in 1 cm Abstand parallel zur inneren Längsseite des Gefäßes und nahe dem Zentralstrahl (s. Abb. 3), und zwar die Wirbelkörper so, daß sie wie bei einer LWS-Aufnahme im seitlichen Strahlengang aufgenommen wurden, die Femurknochen und die Phalanx entsprechend einer ap-Aufnahme. 16 cm Wasserhöhe erwiesen sich als günstig, um diese Röntgenbilder denen normaler Skeletaufnahmen am Menschen vergleichbar zu machen. Das zweite Gefäß wurde 12 cm hoch mit Wasser gefüllt und und darüber ein Keil aus Plexiglas gestellt, dessen Ba-

sis der Länge des Gefäßes entsprach (16cm hoch, 28 cm Schräge). Eine Meßplatte mit Bleimarkierungen wurde bei den Aufnahmen neben den Keil gelegt. Konstante Daten: Fokusabstand 1.10m Belichtungszeit 0,8 sec Unter Verwendung derselben Kassette (30/40) bei allen Aufnahmen wurden die Filme in einer Entwicklungsmaschine (Kodak) 7 Minuten entwickelt.

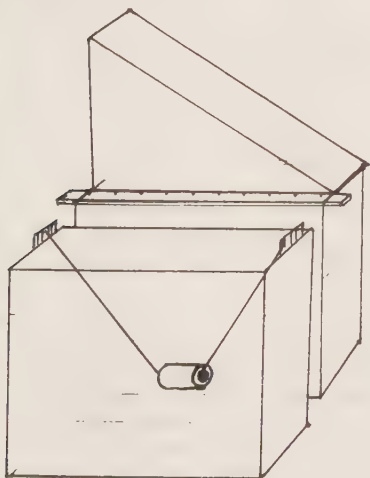


Abb. 2 Anordnung der Gefäße

Die Auswertung erfolgte visuell und photometrisch mit dem Photometer der Firma Lange, Berlin, und einem Galvanometer "Multiplex" Typ MG 2 derselben Firma.

Auf jeder Röntgenaufnahme einer Serie wurden die Mittelwerte der Schwärzungen, die im Inneren des Wirbelkörperschattens bzw. im Lumen der Hörenknochen und direkt neben den Knochen in der "Weichteilumgebung" gemessen wurden, auf dem Keilschatten (2 cm parallel zur inneren Längsseite des Gefäßes) aufgesucht und als Differenzwert in Zentimetern abgelesen. Diese Schwärzungsdifferenzen Knochen : Umgebung wurden in ein Koordinatensystem eingetragen: auf die Abszisse die Zeit in Tagen, auf die Ordinate die Schwärzungsdifferenzen, ausgedrückt in cm Plexiglas- bzw. Wasserdicke. Es ergab sich für alle Knochen eine charakteristische Kurve der Demineralisation vom Ausgangswert bis zur völligen Entkalkung.

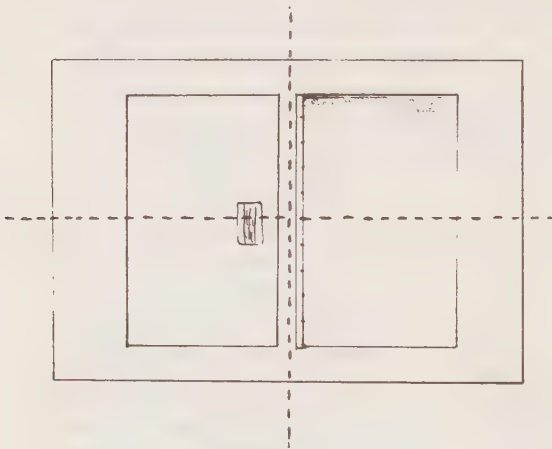


Abb. 3
Beispiel einer
Röntgenaufnahme.
--: Einstellung
des Zentralstrahls.

b. Ergebnisse:

Im folgenden sind die Eichkurven jedes untersuchten Knochens abgebildet. Vor jeder Abbildung werden in einer Tabelle die genauen Meßwerte angegeben.

Als ausführliches Beispiel der photometrischen Auswertung einer Röntgenaufnahme sei Tabelle I (Brustwirbelkörper eines 61jährigen Mannes) angeführt:

BWK 61j. Mann

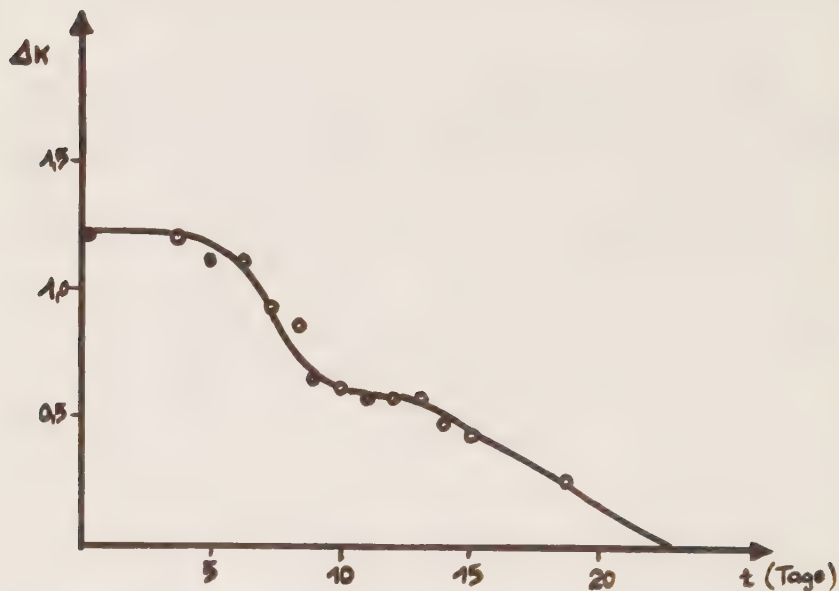
Dauer der Entkalkung (Tage)	Knochen (Mittel- wert)	entsprechen- de Schwärzung auf dem Keil (cm)	Knochen- umgebung (Mittelw.)	entspr. Schw. auf dem Keil (cm)	ΔK	
					Diffe- renz der Keil- werte	
0	2,1	17,3	2,33	19,5		1,2
4	2,13	17,4	2,4	18,6		1,2
5	2,0	16,4	2,22	17,5		1,1
6	2,05	17,2	2,3	18,3		1,1
7	2,1	17,1	2,3	18,0	+	0,9
8	2,45	17,15	2,7	18,0	+	0,85
9	2,4	17,8	2,6	18,5		0,7
10	2,12	18,0	2,25	18,65	++	0,65
11	1,95	17,9	2,1	18,5		0,6
12	2,0	17,4	2,15	18,0	++	0,6
13	2,1	17,9	2,2	18,45		0,55
14	1,91	17,15	2,08	17,6	+++	0,45
15	2,5	18,4	2,65	18,8		0,4
19	2,4	18,9	2,5	19,25		0,35

Legende:

ΔK bedeutet Differenz der Schwärzungsmittelwerte Knochen zu Knochenumgebung, die auf dem Keilschatten aufgesucht wurden und mit Hilfe der abgebildeten Meßlatte in cm ablesbar waren.

+ : Bewertung des Osteoporosegrades nach visueller Beurteilung.

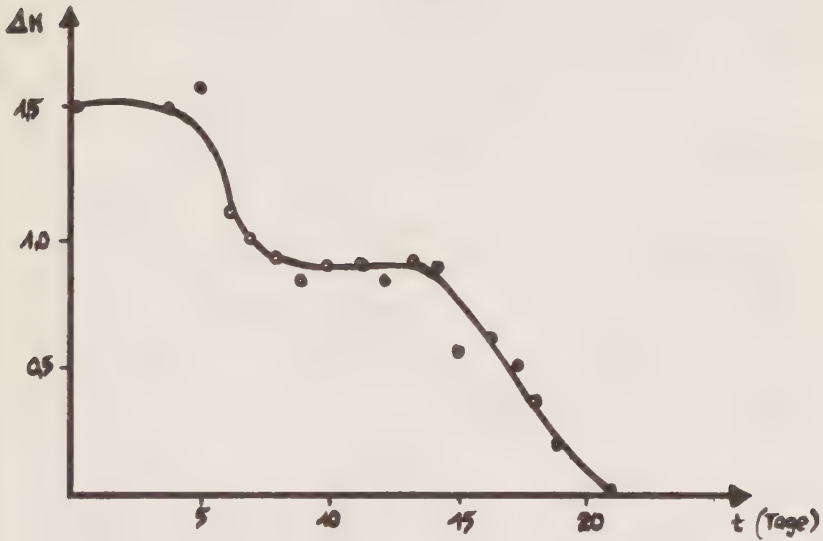
Brustwirbelkörper 61j. Mann



BWK 61j. Mann

Dauer d. Entkalkung(Tage)	Diff. der Keilwerte(cm)	visuelle Beurteilung	errechnete Entkalkung(%)
0	1,2		
4	1,2		
5	1,1		
6	1,1		
7	0,9	+	37,5%
8	0,85	+	44 %
9	0,7		
10	0,65	++	69%
11	0,6		
12	0,6	++	75%
13	0,55		
14	0,45		
15	0,4	+++	100%
19	0,35		

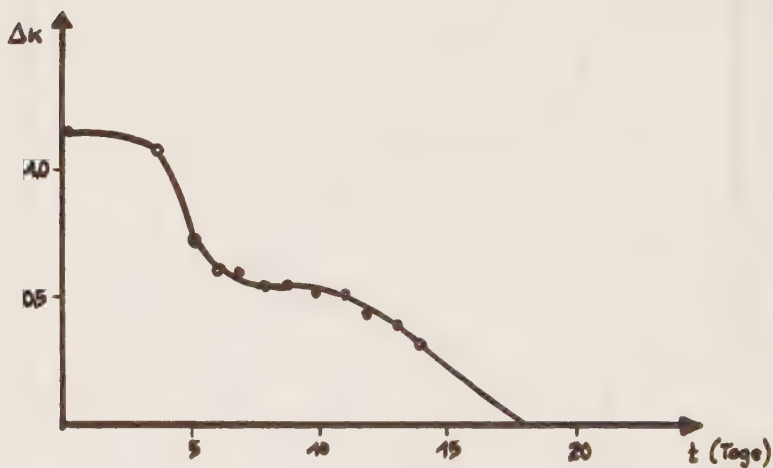
Brustwirbelkörper 81j. Mann



BWK 81j. Mann

Dauer der Entkalkg (Tage)	Diff. der Keilwerte(cm)	visuelle Beurteilung	errechnete Entkalkung
0	1,5		
4	1,5		
5	1,6		
6	1,1		
7	1,0	+	45%
8	0,9	+	54%
9	0,8		
10	0,9		
11	0,9		
12	0,8		
13	0,9	+	54%
14	0,9		
15	0,6	++	81%
16	0,7		
17	0,5	+++	91%
18	0,4	+++	100%
19	0,2		
21	0,0		

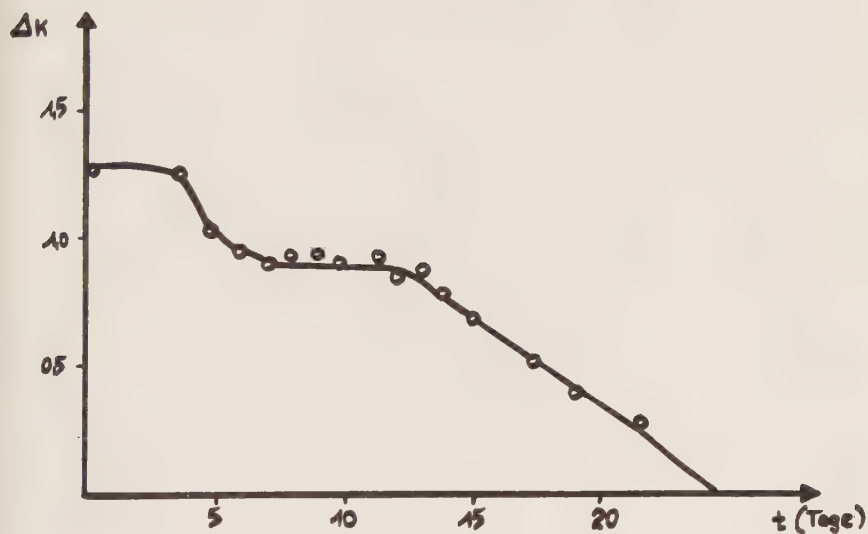
Brustwirbelkörper 43j. Frau



BWK 43j. Frau

Dauer d.Ent- kalkg(Tage)	Diff. der Keilwerte(cm)	visuelle Beurteilg	errechnete Entkalkg(%)
0	1,15		
4	1,1		
5	0,75	+	53%
6	0,6	++	73%
7	0,6	++	
8	0,55		
9	0,55		
10	0,5	++	86%
11	0,5		
12	0,45	+++	94%
13	0,4	+++	100%
14	0,35		

Brustwirbelkörper 64j. Frau

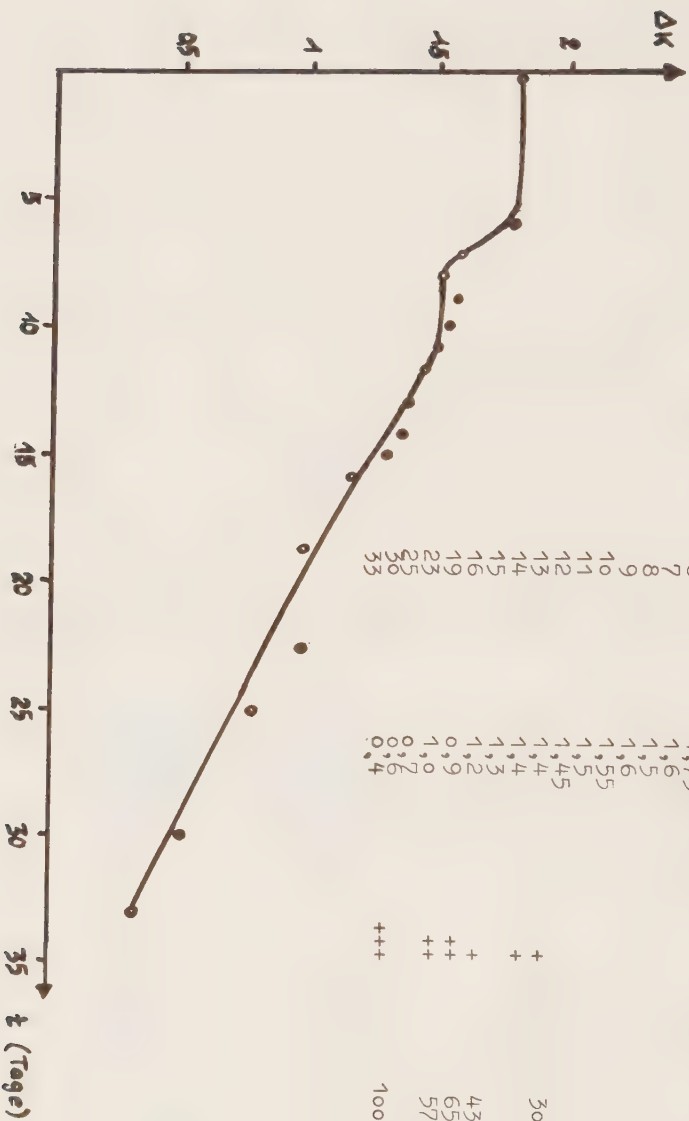


BWK 64j. Frau

Dauer d.Entkalkg(Tage)	Diff. der Keilwerte(cm)	visuelle Beurteilung	errechnete Entkalkg(%)
0	1,3		
4	1,25		
5	1,0		
6	0,9		
7	0,85		
8	0,9	+	44%
9	0,9		
10	0,85	+	50%
11	0,9		
12	0,8	++	56%
13	0,85		
14	0,8		
15	0,7	++	67%
17	0,5	+++	89%
19	0,4	+++	100%
22	0,3		

Lendenwirbelkörper 61j. Mann

Dauer d. Entkalkg (Tage)	Diff. der Keilwerte (cm)	visuelle Beurteilung	errechnete Entkalkg (%)
0	1,75		
6	1,6		
7	1,5		
8	1,5		
9	1,5		
10	1,5		
11	1,5		
12	1,45		
13	1,4		
14	1,4	+	30%
15	1,2	+	43%
16	0,9	++	65%
19	0,6	++	57%
23	0,4		
25	0,4		
33	0,4	+++	100%



Lendenwirbelkörper 61j. Mann

Bei den folgenden Serienaufnahmen zweier Lendenwirbelkörper wurden die Knochen nicht im Ganzen entkalkt, sondern jeweils eine Hälfte mit der Salpetersäure behandelt, während die andere Hälfte in Wasser (zur Verhinderung von Luftansammlung in der Spongiosa) aufgehoben und bei den Aufnahmen genau neben die stufenweise entkalkte andere Wirbelhälfte gehängt wurde. So war auf jeder Röntgenaufnahme ein direkter Vergleich zwischen dem "normalen" und dem "demineralisierten" Knochen möglich, gemessen wurden die Schwärzungsdifferenzen der unterschiedlichen Hälften. Die Abbildungen der Eichkurven zeigen einen Kurvenverlauf, der den vorangehenden genau entgegengesetzt gerichtet ist. Hier ist die Schwärzungsdifferenz zwischen beiden Hälften zu Beginn gleich Null, da der Kalkgehalt noch unverändert ist. Sie steigt mit zunehmender Entkalkung der einen Wirbelhälfte bzw. die Kurve steigt an, bis sich entkalkter und nicht entkalkter Knochen verhalten wie der Schwärzungswert der Umgebung zum nicht entkalkten Knochen. Dies aber war der Ausgangspunkt der Messungen an den vorangehenden Serien. Das spiegelbildliche Übereinstimmen der Kurven beweist die Richtigkeit der ersten Versuchsreihen.

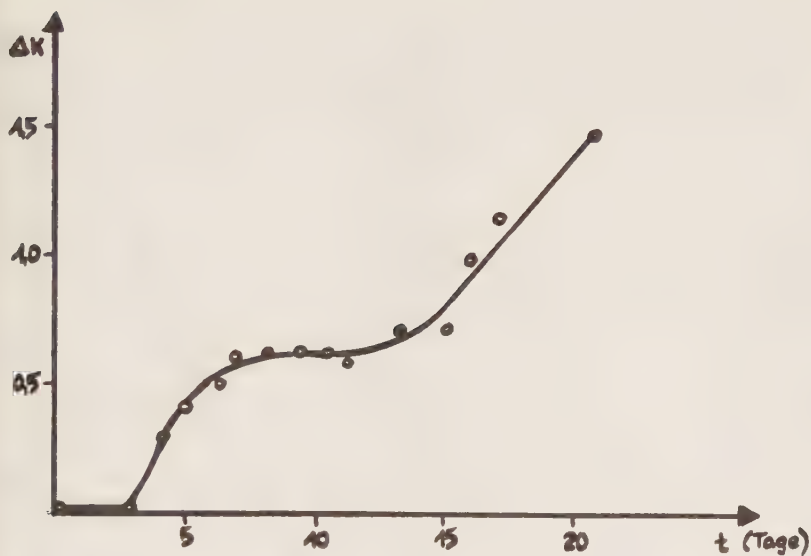
Lendenwirbelkörper 43j. Frau

Dauer d. Entkalkg (Tage)	Diff. der Keilwerte(cm)	visuelle Beurteilung	errechnete Entkalkg(%)
0	0		
4	0		
5	0,2		
7	0,5	+	35%
8	0,8		
9	0,75	++	54%
10	0,8		
11	0,75		
13	0,8	++	57%
15	0,8		
17	1,0	++	70%
19	1,1		
21	1,4	+++	100%

Lendenwirbelkörper 43j. Frau



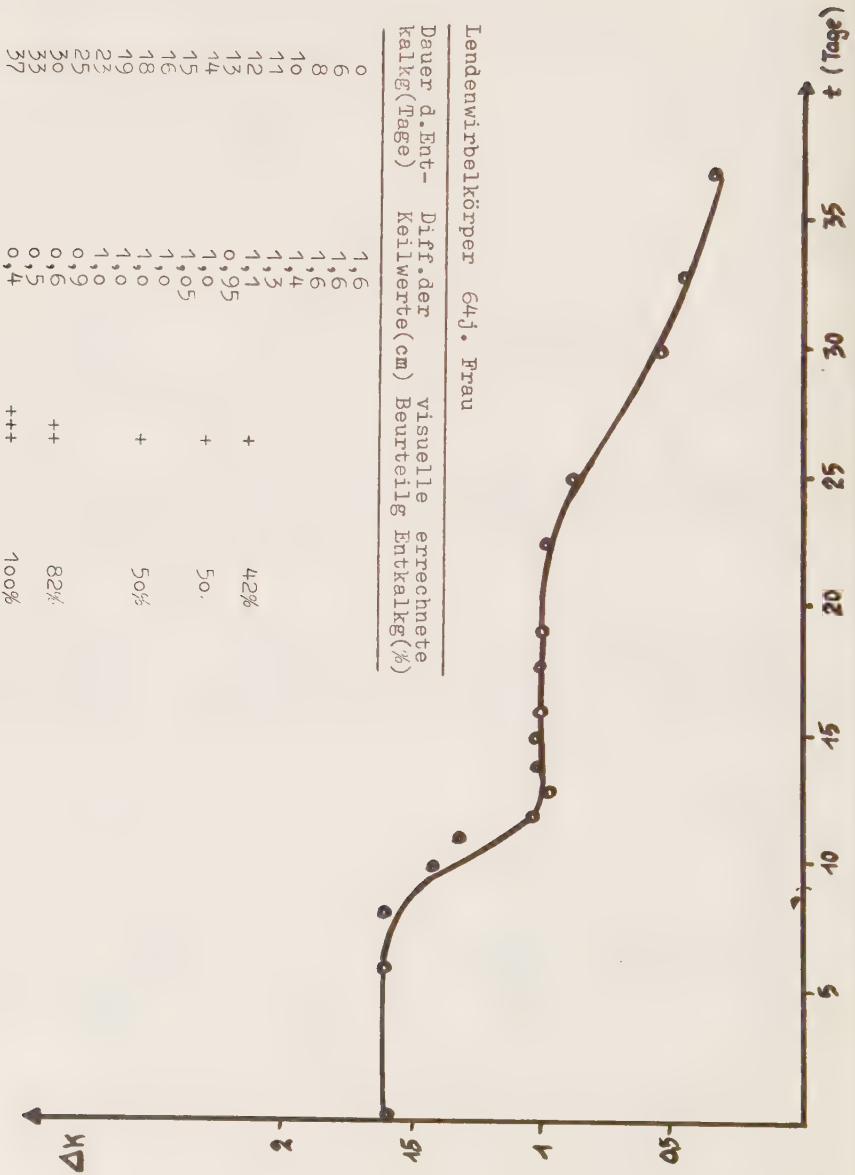
Lendenwirbelkörper 78j. M.



LWK 78j. Mann

Dauer d. Entkalkung (Tage)	Diff. der Keilwerte(cm)	visuelle Beurteilung	errechnete Entkalkung(%)
0	0		
3	0		
4	0,3		
5	0,4		
6	0,5	+	35%
7	0,6	+	
8	0,6		
9	0,6		
10	0,6	+	43%
11	0,55		
12	0,7		
15	0,7		
16	1,0	++	64%
17	1,2	++	86%
21	1,4	+++	100%

Lendenwirbelkörper 64j. Frau



Lendenwirbelkörper 64j. Frau

Dauer d. Ent-
kalkg (Tage) Diff. der
Keilwerte (cm) Visuelle errechnete
Beurteilung Entkalkg (%)

+

42%

+

50.

+

50%

++

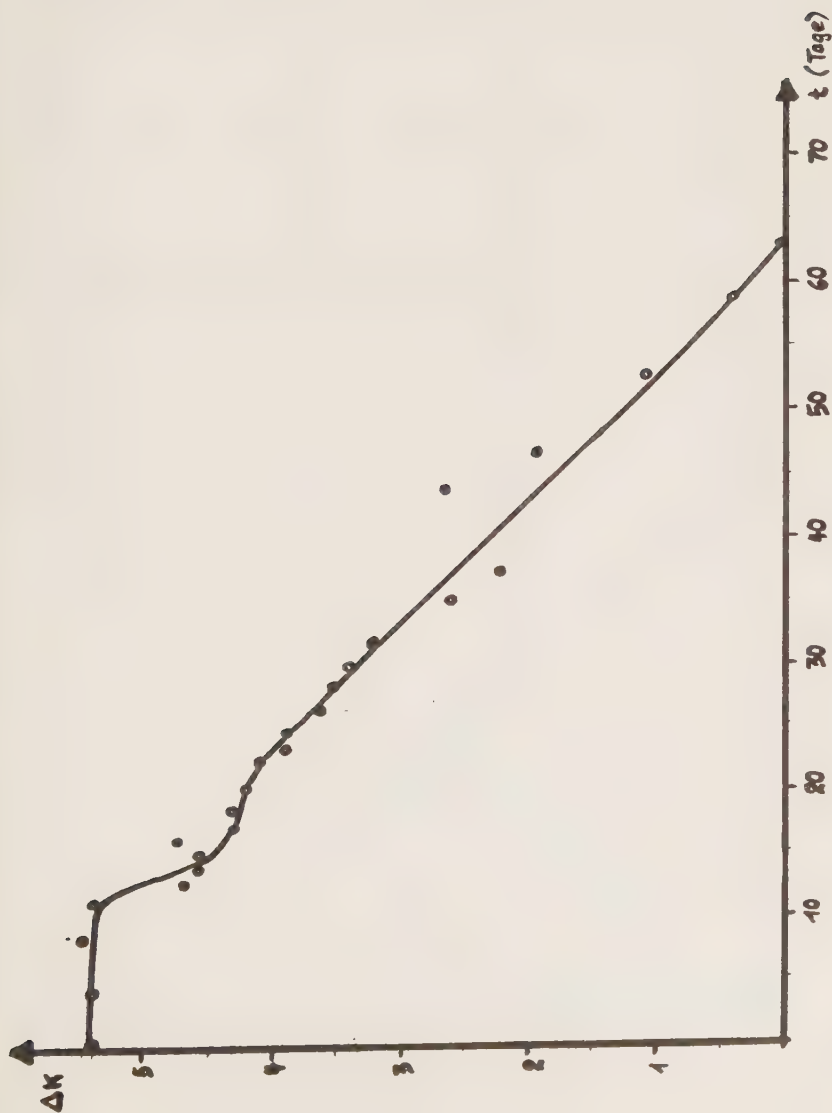
82%

+++

100%

Femurmitte

60j. Mann

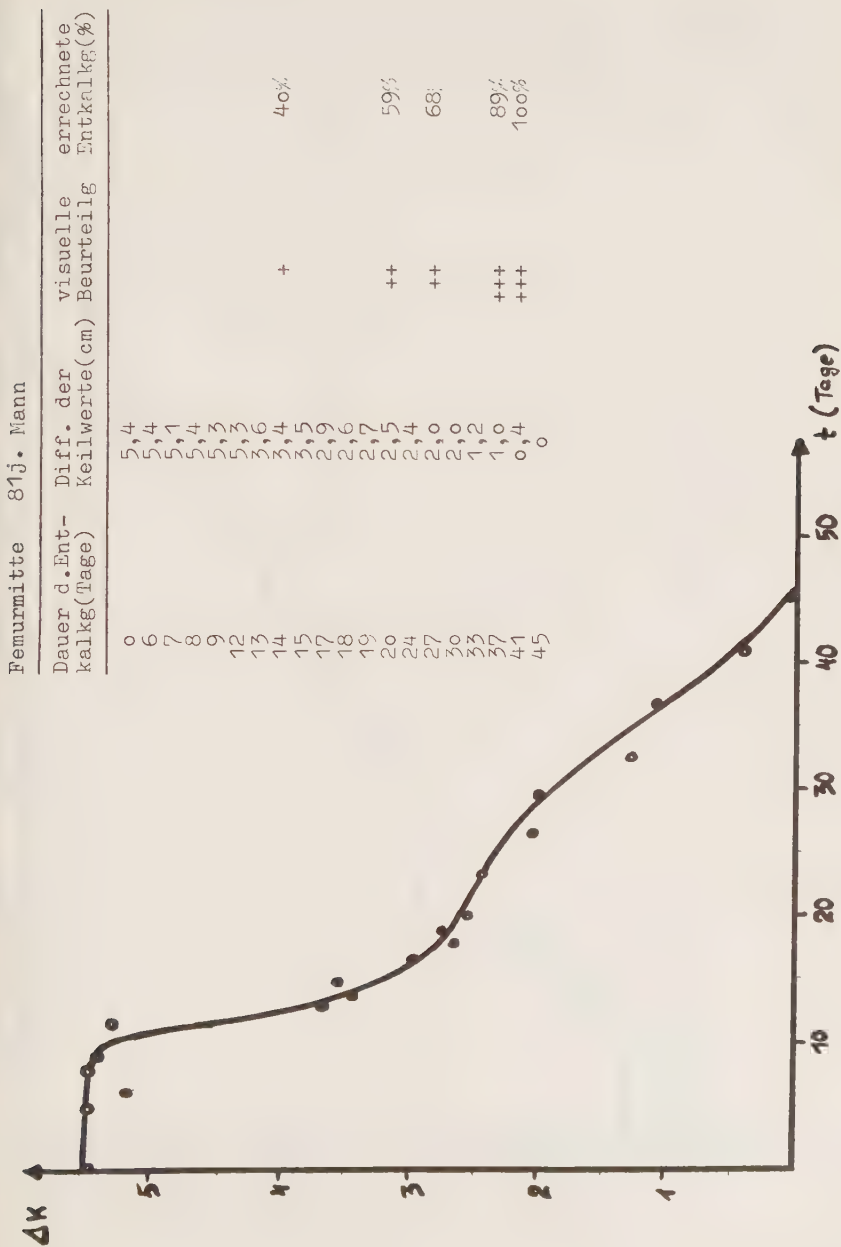


Femurmitte

60j. Mann

Dauer d. Ent- kalkg(Tage)	Diff. der Keilwerte(cm)	visuelle Beurteilung	errechnete Entkalkung(%)
0	5,4		
6	5,4		
8	5,5		
12	5,4		
13	4,6		
14	4,5		
15	4,5		
16	4,7		
17	4,3		
19	4,3		
20	4,2		
21	4,1		
22	4,1	+	30%
23	3,9		
24	3,9		
26	3,6		
28	3,5		
30	3,4		
32	3,1	+	47%
35	2,6		
37	2,2	++	64%
44	2,7		
47	2,0		
53	1,1	++	84%
59	0,4	+++	100%
63	0,0		

Femurmitte 81j. Mann



Femurmitte 67j. Frau

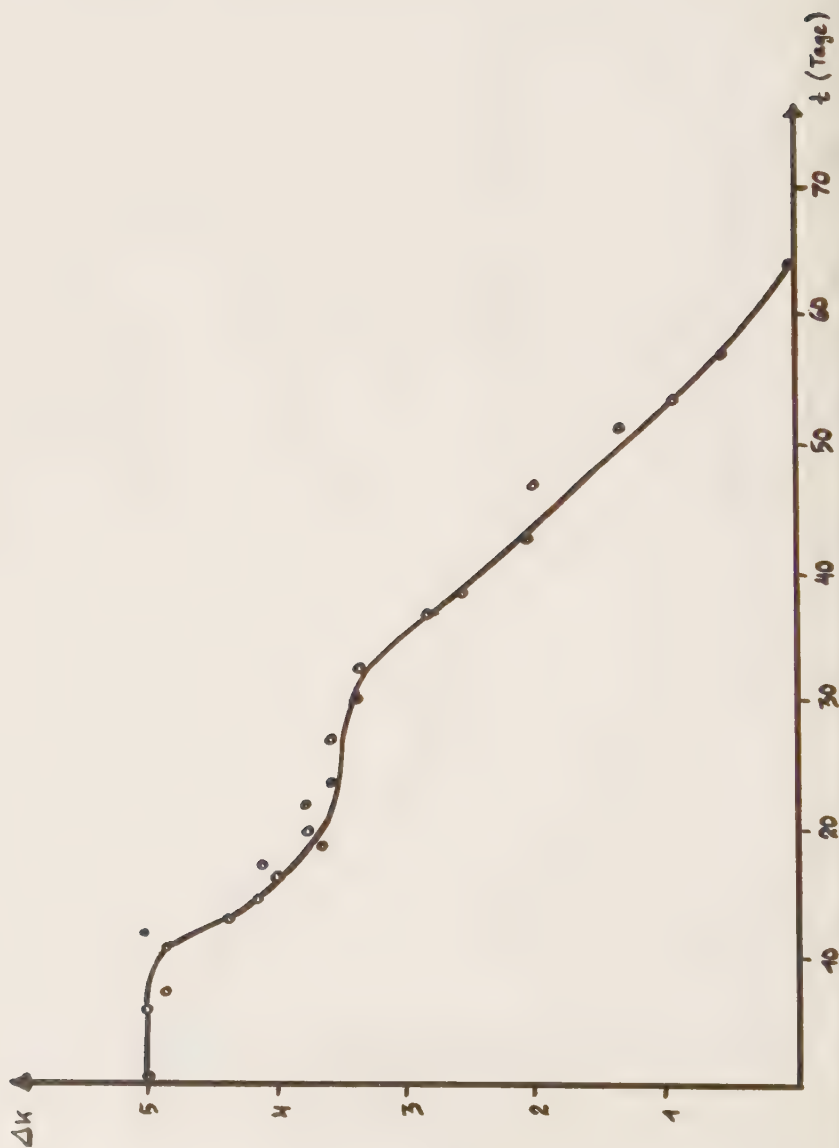


Femurmitte 67j. Frau

Dauer der Entkalkg(Tage)	Diff. der Keilwerte(cm)	visuelle Beurteilung	errechnete Entkalkung
0	4,6		
6	4,6		
8	4,5		
12	4,5		
13	4,4		
14	4,4		
15	3,9		
16	3,9		
17	3,6		
19	3,1		
20	3,0	+	38%
22	2,9		
24	3,0		
27	3,0	+	
33	2,8	+	43%
36	2,5		
40	2,1	++	60%
44	1,8		
49	1,8		
53	1,3	++	79%
58	0,7		
65	0,6	+++	95%
72	0,4	+++	100%
78	0		

Femurmitte

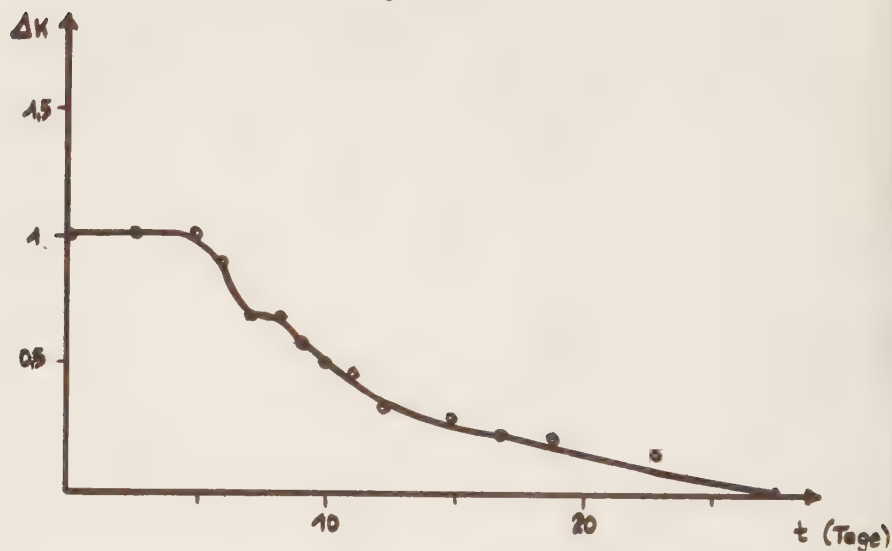
80j. Frau



Femurmitte 8oj. Frau

Dauer d. Ent- kalkg(Tage)	Diff. der Keilwerte(cm)	visuelle Beurteilung	errechnete Entkalkung(%)
0	5,0		
6	5,0		
8	4,8		
12	4,8		
13	5,0		
14	4,3		
15	4,1		
16	4,0		
17	4,1		
18	3,6		
20	3,7		
22	3,7		
24	3,5		
27	3,6		
30	3,4	+	35%
33	3,4		
37	2,8	+	48%
39	2,6		
43	2,0	++	65%
47	2,0	++	
51	1,5	++	76%
53	1,0		
57	0,6	+++	(0,4=100%)
65	0,0	+++	

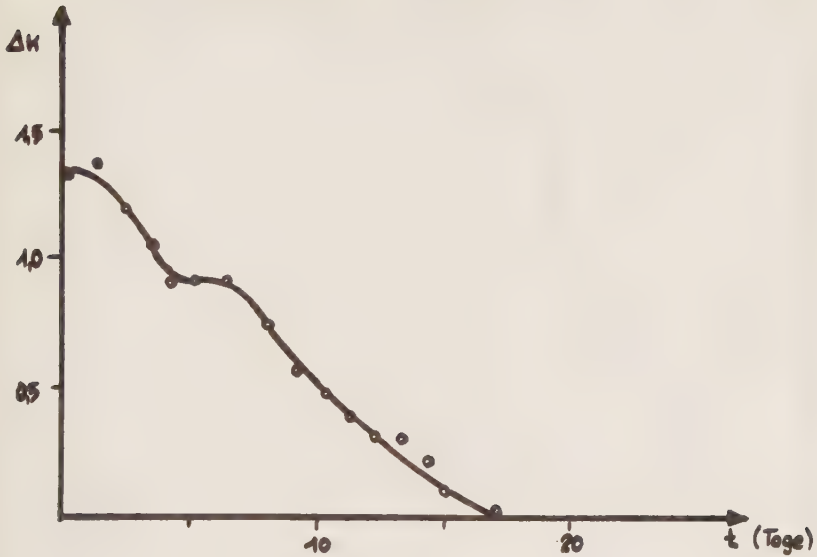
Femurhals 60j. Mann



Femurhals, 60j. Mann

Dauer d. Entkalkung(Tage)	Diff. der Keilwerte(cm)	visuelle Beurteilung	errechnete Entkalkung(%)
0	1,0		
3	1,0		
5	1,0		
6	0,9		
7	0,7		
8	0,7	+	43%
9	0,6	+	57%
10	0,5	++	71%
11	0,45	++	80%
12	0,35		
13	0,35		
15	0,3	+++	(0,4= 100%)
17	0,25		
19	0,25		
23	0,2		
28	0,0		

Femurhals 81j. Mann

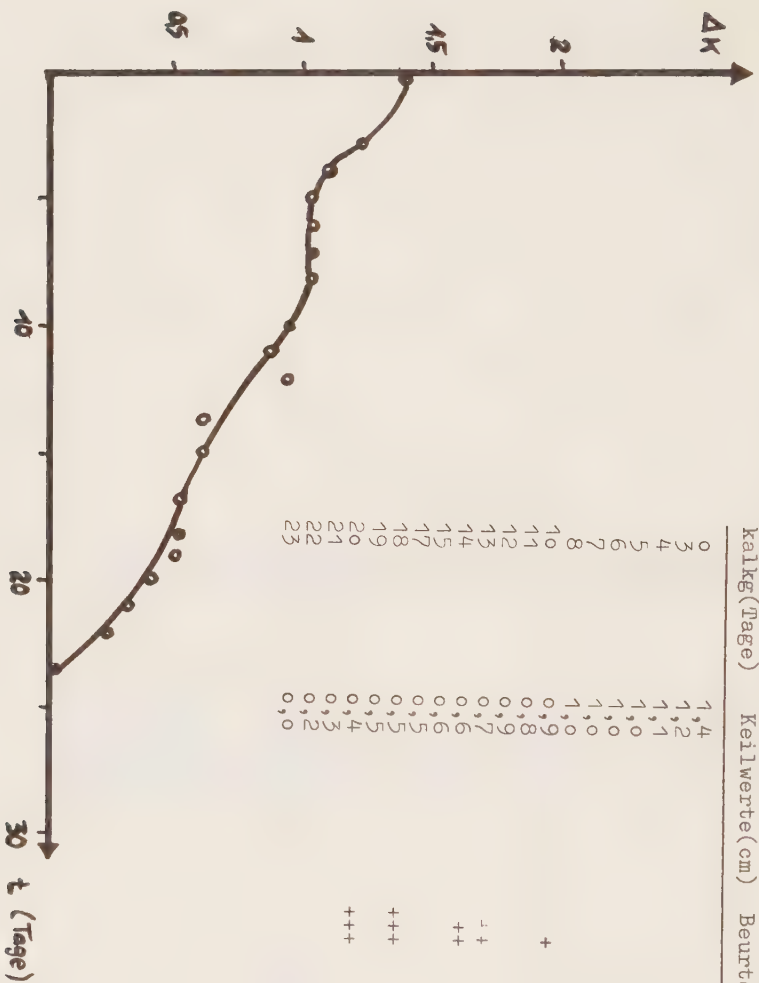


Femurhals, 81j. Mann

Dauer d. Entkalkung(Tage)	Diff. der Keilwerte(cm)	visuelle Beurteilung	errechnete Entkalkung(%)
0	1,35		
1	1,4		
2	1,2		
3	1,05		
4	0,8	+	58%
5	0,8		
6	0,8	+	58
8	0,75		
9	0,6	++	79%
10	0,5		
11	0,4	+++	100%
12	0,3		
14	0,2		
15	0,1		
17	0		

Femurhals, 67j. Frau

Dauer d. Entkalkg(Tage)	Diff. der Keilwerte(cm)	visuelle Beurteilung	errechnete Entkalkg(%)
0	1,4		
3	1,2		
4	1,1		
5	1,0		
6	1,0		
7	1,0		
8	1,0		
10	0,9	+	50.
11	0,9		
12	0,8		
13	0,9		
14	0,7	++	80%
15	0,6		
17	0,5		
18	0,5		
19	0,5	+++	90%
20	0,4		
21	0,3	+++	100%
22	0,2		
23	0,0		



Femurhals 67j. Frau

Femurhals 80j. Frau

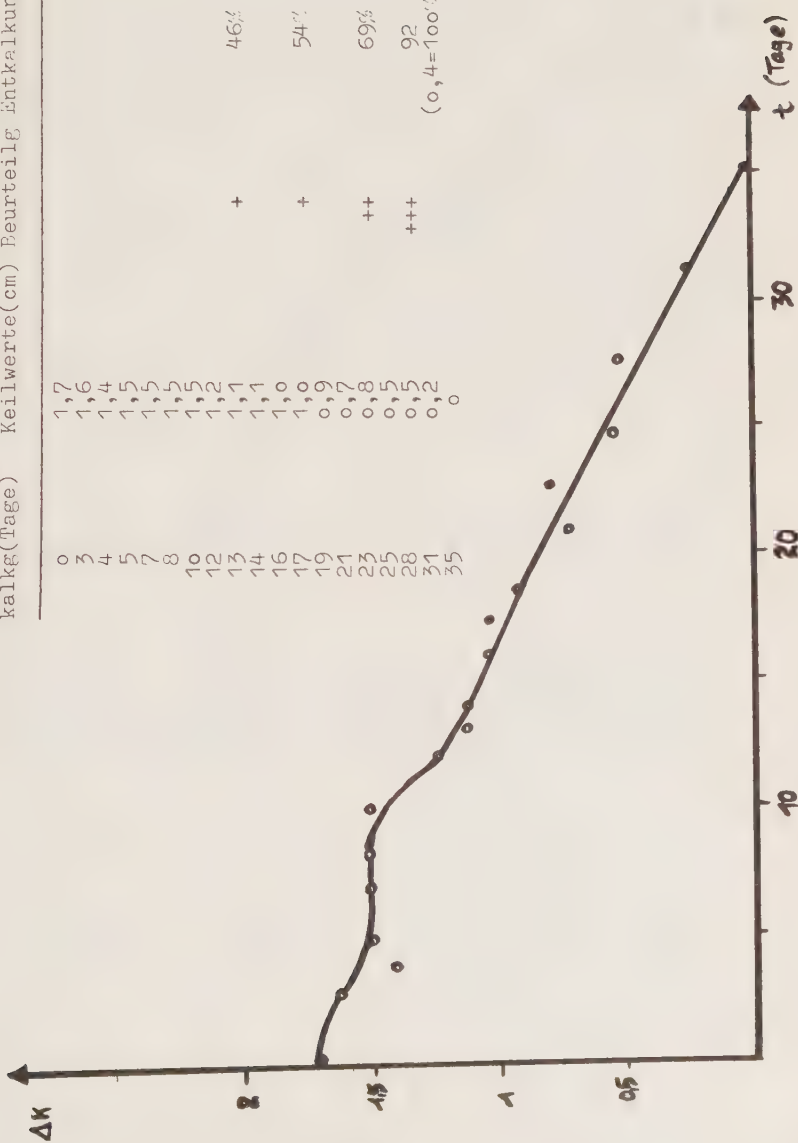
Femurhals 80j. Frau

Dauer d. Ent-
kalkg(Tage)

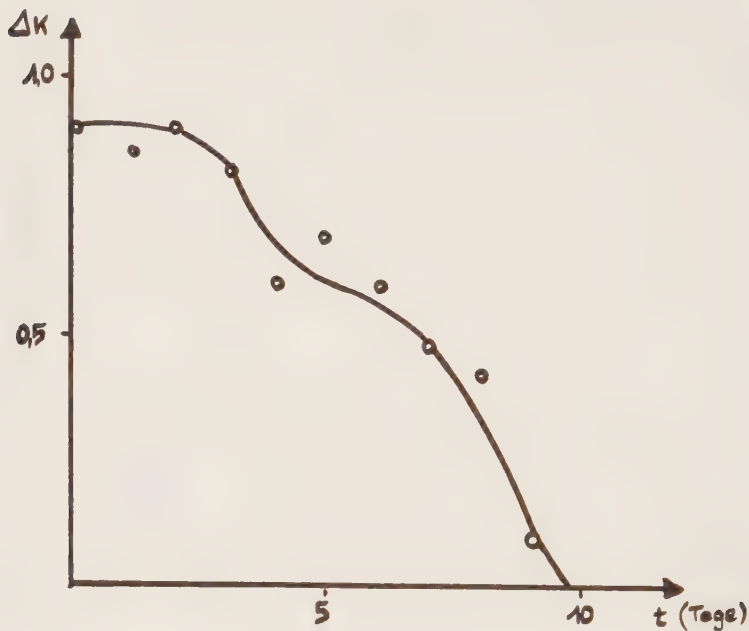
Diff. der
Keilwerte(cm)

visuelle
Beurteilung

(%)



Phalanx (Metatarsale II) , 45j. Mann



Phalanx, 45j. Mann

Dauer d. Entkalkung(Tage)	Diff. der Keilwerte(cm)	visuelle Beurteilung	errechnete Entkalkung(%)
0	0,9		
1	0,85		
2	0,9		
3	0,8		
4	0,6	+	40%
5	0,7		
6	0,6		
7	0,5	++	80%
8	0,4		
9	0,1	+++	100%
10	0,0		

In der folgenden tabellarischen Zusammenfassung wird für jeden der siebzehn mit Säure entkalkten Knochen der errechnete Kalkverlust in Prozent des Ausgangswertes angegeben, der bei visueller Beurteilung der entsprechenden Röntgenaufnahmen unter das Prädikat "+ = mäßig entkalkt" und "++ = stark entkalkt" fiel. Zur Berechnung des Kalkverlustes wurde der empirisch gefundene Wert ΔK 0,4 = 100% Entkalkung verwendet, da auf keiner Röntgenaufnahme mit dem Auge eine Differenz der Schwärzungswerte Knochen zu Knochenumgebung, die kleiner als 0,4 cm ist, zu erkennen war. Bei den Lendenwirbelkörpern der 43j. Frau und des 78j. Mannes tritt ΔK als Differenz der Schwärzungswerte von nicht entkalkter zu entkalkter Knochenhälfte auf derselben Röntgenaufnahme auf, die "Sichtbarkeitsschwelle" muß in dieser Relation nicht berücksichtigt werden.

Knochen	+ = mäßig entkalkt	++ = stark entkalkt
BWK 61 m	38%, 44%	69%, 75%
BWK 81 m	45%, 54%	81%
BWK 43 w	60%, 73%	86%
BWK 64 w	45%, 50%	56%, 67%
LWK 61m	36%, 43%	57%, 65%
LWK 78m	35%, 43%	64%, 85%
LWK 43w	35%	54%, 71%
LWK 64w	42%, 50%	82%
FM 60 m	30%, 47%	64%, 84%
FM 81 m	40%	58%, 68%
FM 67 w	38%, 43%	60%, 79%
FM 80 w	35%, 43%	65%, 76%
FH 60 m	43%, 57%	71%, 78%
FH 81 m	56%	79%
FH 67 w	50%	70%, 80%
FH 80 w	46%, 53%	69%
Phalanx 45m	40%	80%

(FM= Femurmitte, FH= Femurhals)

V. DISKUSSION

1. Deutung der Versuchsergebnisse

Die Entkalkung eines toten menschlichen Knochens mit Salpetersäure ahmt nicht den Vorgang im lebenden Körper, der zu einer diffusen Osteoporose führt, nach: es bleibt unberücksichtigt, ob es sich im klinischen Fall um eine Strukturverminderung oder um eine Entmineralisierung handelt. Die künstliche Entkalkung der Knochen erfolgte durch deren Hineinhängen in die Säure: die "Schale" der Knochen hatte also den intensivsten Kontakt mit der Salpetersäure, im Inneren der Knochen aber war der Kontakt erschwert, weil die Säure nur langsam durch die feste Knochensubstanz eindringen kann (zB durch die Kompakta der Zylinder der Femurdiaphysen), und weil durch Oxydation der organischen Marksubstanz, die die Spongiosa im Wirbelkörper und im Femurhals ausfüllt, die Konzentration der Säure gemindert wird.

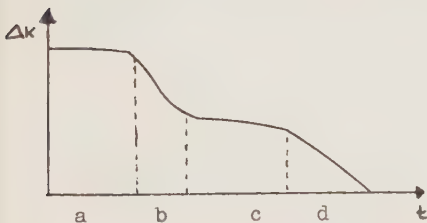
Auf den Serienaufnahmen eines Wirbelkörpers zeigten sich folgende Veränderungen:

zunächst wurden die Konturen weicher und verschwommener, dann betraf dieser Vorgang den Spongiosaraum, der langsam zentripetal zusammenschmolz und selbst auch in seiner Struktur und Schattengebung immer undeutlicher wurde. Auf den Röntgenaufnahmen wurden photometrisch immer vier verschiedene Orte auf der Fläche des von der Spongiosa hervorgerufenen Schattens gemessen, wobei auch die stärker entkalkten Randzonen (nicht die kalkreicheren Konturen) berücksichtigt wurden. Der Mittelwert ging in die Tabelle ein. Die oben beschriebenen Veränderungen traten in ähnlichem Ablauf auch bei den Oberschenkelhalsstücken und der Phalanx auf. Bei den Femurdiaphysenstücken zeigte sich eine diffuse Abnahme der Schattengebung, gemessen im zentralen, dem Knochenmarkslumen entsprechenden Raum.

Beim Vergleich der Kurven fällt auf, daß alle den gleichen charakteristischen Verlauf zeigen: einem ersten Plateau folgt ein mehr oder minder steiler und tiefer Abfall auf ein niedrigeres zweites Plateau, von dem aus die Kurve weniger steil und stetig fällt. Die Länge der Kurven (=Dauer der Säurebehandlung bis zur völligen Entkalkung) ist abhängig vom Kalkgehalt des Knochens vor Versuchsbeginn, speziell vom Verhältnis Kortikalis : Spongiosa. Den längsten Verlauf zeigen daher naturgemäß die Kurven der Femurdiaphysenstücke, gefolgt von den Kurven der Lendenwirbelkörper. Der Beginn des Kurvenabfalls (= Zeitpunkt des Beginns der Entkalkung) erfolgt umso später, je stärker die Kortikalis des jeweiligen Knochenstücks angelegt ist, also am spätesten wieder bei den Femurdiaphysenstücken. Der erste Kurvenabfall tritt bei der Phalanx früh und nur angedeutet auf, später und zunehmend ausgeprägter bei den Oberschenkelhalsstücken, den Brust- und Lendenwirbelkörpern. Dies legt die Vermutung nahe, daß der erste starke Entkalkungsschub erst dann erfolgen kann, wenn die Säure nach Durchdringen der äußeren Kompakta die darunter liegende Knochensubstanz erreicht hat. Bei der Phalanx mit der sehr dünnen Kortikalis geschieht das schon nach kurzer Einwirkungszeit, bei der Kompakta des Röhrenknochens viel später.

Das zweite Plateau ist am längsten bei den spongiosa- und markreichen Wirbelkörpern ausgebildet, die Oxydation des organischen Materials hält offenbar zunächst eine weitere kontinuierliche Entkalkung auf. Die photometrische Auswertung

dieser Phase ergibt einen Kalkverlust zwischen 40% bis 60%, die visuelle Beurteilung ein "mäßig entkalkt". Klinisch stellt dieser Kalkgehalt die Bruchgrenze dar.



- a= Zeit, in der die Säure die Kortikalis durchdringt.
- b= Demineralisation bis zur Bruchgrenze
- c= passagere Konzentrationsschwäche durch Auflösung d. Marks
- d= kontinuierliche "unphysiologische" Knochenauflösung

Welcher Grad von Entkalkung muß nun vorliegen, bei dem frühestens röntgenologische Veränderungen im Sinne einer Osteoporose diagnostiziert werden können? In der vorausgegangenen Tabelle stehen für alle Knochen bzw. Knochenteile die Werte, die dem ersten "+ = mäßig entkalkt" entsprechen, untereinander: sie schwanken zwischen 30% und 50% Kalkverlust. Betrachtet man die Werte gruppenweise, so differieren sie innerhalb einer Gruppe jedoch nur um unter 10%. Das Ausmaß der Entkalkung, das zur Diagnose einer beginnenden Osteoporose an Hand einer Röntgenaufnahme nötig ist, ist also nicht in jedem Knochen und auch nicht in jedem Teil eines Knochens gleich.

Bei den Brustwirbelkörpern finden sich die Werte: 38%, 45%, 45%, 60%. Bei den Serienaufnahmen des letzten BWK (43j.Frau) erfolgte ein plötzlicher steiler Abfall des Kalkgehaltes innerhalb von 24 Stunden, so daß ein kontinuierlicher Vergleich infolge mangelnder Aufnahmen in einem kleineren zeitlichen Abstand als 24 Stunden nicht möglich war. Dieser Wert muß daher bei der Berechnung des Mittelwertes wegfallen. Der frühest sichtbare Grad der Entkalkung beträgt bei den Brustwirbelkörpern im Mittel 42,5%.

Bei den Lendenwirbelkörpern ergibt sich der Mittelwert aus den Werten 36%, 42%, 35% und 35%, nämlich 37%.

Bei den Femurdiaphysen ergibt sich der Mittelwert aus den Werten 30%, 40%, 35% und 38%, also 36%.

Der höchste Mittelwert ergibt sich bei den Oberschenkelhalsstücken: 46% (aus 50%, 46%, 43% und 58%, wobei der letzte Wert aus demselben Grund wie im Falle des BWK der 43j.Frau nicht berücksichtigt werden kann.

Bei der Phalanx werden erst 40% Entkalkung sichtbar.

Die Erklärung für die unterschiedliche visuelle Beurteilung des Osteoporosegrades bei den verschiedenen Knochen bzw. Knochenteilen liegt wiederum in deren unterschiedlichem Kalk-

gehalt bei Versuchsbeginn: wenn der Knochen stark kalkhaltig ist, kann das Auge die einzelnen Stadien der Entkalkung besser erkennen und auseinanderhalten, als wenn der Knochen schon zu Beginn wenig Schatten auf der Röntgenaufnahme gibt. Das letztere gilt besonders für die Oberschenkelhalsstücke und die Phalanx.

Zwischen welchen Graden von Entkalkung kann man auf der Röntgenaufnahme unterscheiden? In der oben angeführten Tabelle stehen in der Spalte unter "++ = stark entkalkt" die entsprechenden Werte des errechneten Kalkverlustes, die diese visuelle Beurteilung objektivieren sollen. Sie schwanken zwischen 56% und 80%, wobei wiederum die Schwankungen innerhalb einer Knochengruppe geringer sind.

Brustwirbelkörper: der Mittelwert 73% Entkalkung="stark entkalkt" ergibt sich aus den Werten 69%, 81%, 86% und 56%, wobei 86% extrem hoch erscheint.

Lendenwirbelkörper: Mittelwert 58% = "stark entkalkt", aus 57%, 54% und 64%. Bei LWK 64 konnte das früheste "++" nicht ermittelt werden, da eine Aufnahme in dem bestimmten Zwischenraum fehlte.

Femurdiaphysen: Mittelwert 61,5%, aus 60%, 64%, 65% und 58%.

Oberschenkelhalsstücke: Mittelwert 72%, aus 70%, 69%, 71% und 79%.

Phalanx: bei 80% Kalkverlust "stark entkalkt".

Es fällt auf, dass das Prädikat "++ = stark entkalkt" zu einem früheren Zeitpunkt der Entkalkung bei den Lendenwirbelkörpern und den Femurdiaphysen gestellt werden kann, und zwar bei einem Kalkverlust von ungefähr 60%, während die Brustwirbelkörper und Oberschenkelhalsstücke zu 70% entkalkt sein müssen, um genauso beurteilt zu werden. Diese unterschiedlichen Ergebnisse zwischen den Knochengruppen entsprechen denen der ersten Untersuchung bei "+ =mäßig entkalkt". Wieder spielt das Differenzierungsvermögen des Auges eine wichtige Rolle.

Um nun die minimale gerade noch feststellbare Differenz im Kalkgehalt auf zwei Serienaufnahmen eines Knochens festzustellen, muß für jeden angeführten Knochen der letzte Wert, der noch unter "mäßig entkalkt" fällt, mit dem ersten Wert, der schon unter "stark entkalkt" fällt, verglichen werden.

Brustwirbelkörper: 25%, 33%, 13% und 6% sind Werte, die stark differieren. Es erscheint unwahrscheinlich, daß 6% Entkalkung tatsächlich auf zwei Serienaufnahmen zu unterscheiden sind. Wahrscheinlicher ist, daß sich hier die Fehlerquelle, die bei jeder Aufnahme drohte, stärker bemerkbar gemacht hat: jeder Knochen mußte genauestens horizontal und ohne zu Kippen im Wasser aufgehängt werden. War das nicht der Fall, so konnte das zu kaum merklichen Verdichtungen oder Aufhellungen durch Überlagerung von Strukturen kommen, die dann im Vergleich zu anderen Aufnahmen der Serie eine Abnahme oder Zunahme des Kalkgehaltes vortäuschten.

Lendenwirbelkörper: bei 14%, 32% (?), 19% und 21% Differenz des Kalkgehaltes konnte man diese auch visuell unterscheiden.

Femurdiaphysen: 17%, 27%, 17%, 18%.

Oberschenkelhalsstücke: 20%, 16%, 14%, 21%.

Phalanx: 40% Kalkverlust waren erst unterscheidbar.

Ein Vergleich zwischen den Ergebnissen der einzelnen Knochengruppen zeigt, daß hier die Werte nicht so auffällig auseinandergehen. Bei siebzehn Knochen war es dreimal möglich, schon 13% bzw. 14% Differenz im Kalkgehalt zu unterscheiden, dreimal 16% bis 17%, dreimal 18% bis 20% und zweimal 21%. Extreme Werte sind 25%, 27%, 33% und 6%, die wahrscheinlich auf die oben angeführte Fehlerquelle zurückzuführen sind. Dagegen scheinen die 40% sichtbare Differenz im Kalkgehalt der Phalanx gut möglich zu sein. Das Metatarsale zeigte schon auf der ersten Aufnahme noch vor der Säurebehandlung eine recht schwache Schattengebung, die im Laufe der Versuche eine genauere Differenzierung der Veränderung des Kalkgehaltes kaum zuließ.

Zusammenfassend läßt sich also folgendes feststellen:

1. Eine mäßige Osteoporose zeigt sich nicht bei jedem Knochen des menschlichen Skeletts und nicht in jedem Teil eines Knochens bei demselben Grad an Entkalkung. Sie läßt sich bei den Lendenwirbelkörpern und Femurdiaphysen frühestens bei etwa 36% Kalkverlust diagnostizieren, bei Brustwirbelkörpern und Oberschenkelhalsstücken erst ab einem Kalkverlust von 43% bzw. 46%, bei einer Phalanx ab 40%.
2. Um eine Osteoporose stärkeren Grades diagnostizieren zu können, bedarf es eines weiteren Kalkverlustes von ungefähr 20%. In günstigen Fällen können auch schon 14-15% Kalkverlust sichtbar werden. Die Differenzierungsmöglichkeit scheint bei einer Phalanx am schwierigsten zu sein, allerdings wurde nur ein Exemplar untersucht.

Diese experimentell gefundenen Ergebnisse dürfen aber für den praktischen klinischen Fall nicht als unbedingt verbindliche Werte fehlgedeutet werden, da hier nur die Schattendichte = Mineralgehalt gemessen wurde, während bei der visuellen Beurteilung der Röntgenaufnahme eines Patienten sowohl die Schattendichte als auch die Struktur bewertet werden.

2. Bedeutung für die Klinik

Die Ergebnisse dieser Arbeit stimmen nicht ganz mit denen von Babaiantz und Lachman überein: Babaiantz gab einen Kalkverlust von 30% an, der nach Säurebehandlung an Wirbelkörperscheiben frühestens auf der Röntgenaufnahme sichtbar werden könnte. Seine Methode unterschied sich von der hier angegebenen dadurch, daß er den Weichteilschatten vernachlässigte und zudem die Dicke der Knochen auf 1cm reduzierte. So war es möglich, auf den Röntgenaufnahmen die Knochenstruktur sehr fein und genau zu erkennen, und ebenso deren frühe Veränderungen nach Säurebehandlung. Seine Aufnahmen sind aber kaum

mit den normalen Routineaufnahmen z.B. der LWS vergleichbar, da bei diesen durch den Weichteilschatten die Struktur des Knochens selbst verschwommener erscheint und die Knochenumgebung auch eine stärkere Schattengebung zeigt, so daß der Kontrast zwischen beiden Medien nicht so deutlich wird wie bei den Aufnahmen von Babaianitz: dort lagen die Knochenscheiben in freier Luft.

Lachman gab an, bei besten Versuchsbedingungen und Serienuntersuchungen an einem Knochen seien Unterschiede im Kalkgehalt von 7% sichtbar geworden. Seine Originalarbeit liegt in keiner Bibliothek West-Berlins oder der Bundesrepublik vor, so ist mir die Versuchsanordnung nicht bekannt. Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse können seine Ergebnisse nicht bestätigen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit verschlechtern also weiter die Möglichkeit, eine beginnende Osteoporose auf den üblichen Röntgenaufnahmen ohne Spezialmethoden zu erkennen. Zwar erscheint es in Einzelfällen möglich, auch schon einen Kalkverlust von 30% zu erkennen, aber durchschnittlich liegt doch die untere Grenze bei 35%, und das auch nur bei LWK- und Oberschenkelchaftaufnahmen. Brustwirbelkörper, Oberschenkelhals und Phalangen zeigen erst ab 40% Kalkverlust sichtbare Veränderungen. Dabei ist noch der Zeitpunkt der Aufnahme zu berücksichtigen, der ja durchaus auch gegen Ende des Auftretens der ersten sichtbaren Veränderungen liegen kann, ohne daß die visuelle Beurteilung schon ein "stark entkalkt" ergeben würde. Diese Spanne, in der visuell nur eine leichte Osteoporose festgestellt werden kann, aber der Grad der Entkalkung zunimmt, beträgt 20-30% Kalkverlust. Bei der Diagnose einer leichten Osteoporose brauchen also erst 35% Entkalkung vorzuliegen, es kann sich aber auch schon um eine 50-60%ige Entkalkung handeln!

So wird in den meisten Fällen schon eine fortgeschrittene Osteoporose vorliegen, wenn der Röntgenologe frühe Zeichen einer Entkalkung zu erkennen glaubt. Hinzu kommen die Fehlerquellen, die durch die mehr oder weniger große Erfahrung des Arztes, die Lagevariationen und die Filmqualitäten entstehen.

Die visuelle Beurteilung des Knochenmineralgehaltes auf Röntgenaufnahmen ist eine mit vielen Fehlerquellen behaftete unzulängliche Methode. Die sichere Diagnose einer Osteoporose läßt sich erst zu einer Zeit stellen, in der die frühe Phase der Demineralisation nahezu abgeschlossen ist. Die Therapie muß aber einsetzen, bevor der Knochen die Fähigkeit zur Remineralisation verloren hat.

5. Folgerung für die speziellen radiologischen Untersuchungsmethoden.

Es ist notwendig, eine exakte Diagnose zu Beginn einer Osteoporose stellen zu können. Durch visuelle Beurteilung der üblichen Skelettaufnahmen kann diese Forderung nicht erfüllt werden. Die Methoden der vergleichenden Schwärzungsmessung und der quantitativen Absorptionsmessung konnten sich wegen ihrer Umständlichkeit, notwendiger Spezialapparaturen, komplizierter Umrechnungen und ihrer nur peripheren Anwendbarkeit nicht durchsetzen. In mehreren Kliniken bewährt hat sich das von Krokowski angegebene Verfahren der röntgenologischen Substanzanalyse mit differenten Strahlenqualitäten. Bei einer Fehlerbreite von $\pm 4\%$ kann es zur Untersuchung jedes Knochens im Körper verwendet werden. Allerdings muß ein Generator zur Verfügung stehen, der eine Spannung von 200 kV und mehr erzeugen kann.

Die quantitative Bestimmung des Mineralgehaltes der Wirbelsäule, von der die pathologische Osteoporose ihren Ausgang nimmt, sollte eine breitere Verwendung finden.

VI ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchung von Babaiantz 1949 bildet die Grundlage für die visuelle Beurteilung von Röntgenaufnahmen hinsichtlich des Mineralsalzgehaltes. Babaiantz stellte fest, daß im Experiment erst eine Demineralisation von 30% sicher erkannt werden kann. Da die Untersuchungen unter vereinfachten experimentellen Bedingungen durchgeführt wurden, nämlich

- a) fehlender Weichteilmantel
- b) Verwendung von Knochenscheiben von nur 1cm Dicke,

wurden diese Untersuchungen unter besserer Anpassung an physiologische Verhältnisse noch einmal wiederholt.

Die Ergebnisse lassen sich in folgenden Punkten zusammenfassen:

1. Der Diagnose einer mäßigen Osteoporose bei visueller Beurteilung entspricht ein Mineralverlust des Knochens von 35 % bis 50 %.
2. Lendenwirbelkörper und Femurdiaphysen lassen schon bei etwa 35% Kalkverlust eine Demineralisation erkennen, Phalangen, Brustwirbelkörper und Oberschenkelhalsstücke müssen schon 40% bis 46% Knochenmineralsalz verloren haben, bevor sie auf der Röntgenaufnahme die Zeichen einer Osteoporose zeigen.
3. Um eine Osteoporose stärkeren Grades diagnostizieren zu können, bedarf es eines weiteren Kalkverlustes von 15- 20%.

VII Literaturangaben

1. Bürger, M. Dtsch. med. Wschr. 85 (1960), 1493
2. Haas, H.G. Knochenstoffwechsel- und Parathyreoidaerkrankungen, Georg Thieme Verlag 1966
3. Hesch, R.D. Die Kalziuminfusion in der Diagnostik der Osteoporose, Dissertat. Berlin 1967
4. Nordin, B. The Pathogenesis of Osteoporosis Lancet 1, 1961, 1011
5. Haas, H.G. s. unter 2.
6. Neumann, M. Aquisitions récentes sur les Ostéoporoses. La Presse medical, 8(1966), 376
7. Hioco, D. Physiopathologie und Therapie der Osteoporose. Dtsch. med. Wschr. 23, 1966, 1080
8. Schwarz, G. Grundlagen der alimentären Kalziummangeltheorie und der oralen Kalziumtherapie der Osteoporose. Fortschr. d. Medizin 22 (1964), 853
9. Heany, R.P. A unified concept of osteoporosis Amer. J. of med. 6, 1965, 878
10. Hesch, R.D. s. unter 3.
11. und
12. Krokowski, E. Frühdiagnose und Verlauf d. Osteoporose Münchner Med. Wschr. 1967, heft 39
13. Kuhlencordt, Wiontzek, Bartelheimer Die Dauerbehandlung d. Osteoporose mit anabolen Steroiden. Dtsch. med. Wschr. 90, 1965, 386
14. Krokowski, E. Osteoporoseschmerz u. Röntgenbefund Dtsch. med. Journal 1965, 16, S. 393
15. Urist, R. Neue Vorstöße zum Problem der Osteoporose. J. of Bone and Joint Surgery 44 B, 1962, 464

29. Györgyi, Bozoki Der lineare Schwächungskoeffizient als Maßstab des Mineralgehaltes d. Knochens
Fortschr. Rö 94 (1961) 667
30. Frommhold,
Schoknecht Untersuchung über die Absorption und
Feinstruktur von Knochen mittels mono-
chromat. Röntgenstrahlen.
Fortschr. Rö 93 (1960) 358
31. Cameron, Grant,
MacGregor An improved technic for the measurement
of bone mineral content in vivo.
Radiology, 78 (1962), 117
32. Krokowski,
Schlungbaum Objektivierung der röntgenolog. Diagnose
Osteoporose. Fortschr. Rö 91 (1959), 740
- Krokowski u. Oeser Röntgenstrahlen zur visuellen Knochen-
biopsie zwecks Bestimmung d. Mineralge-
haltes DtW 86 (1961), 2431
- Krokowski, E. Die Absorption von Röntgenstrahlen im
Knochen. Fortschr. Rö 91 (1959), 76
33. Lachman, E. Osteoporose, die Möglichkeiten und Gren-
zen ihrer röntgenolog. Diagnose.
Am. J. of Rö and Rad. Therapy, 74 (1955)
S. 712.
34. Babaianz, L. Les Osteopathies atrophiques
J. radiol. electrol. 29 (1948), 333
35. Caldwell, Collins Accessment of vertebral osteoporosis
by radiographic and chemical methods
post mortem.
J. of bone and joint surgery 43,2 (1961)
S. 346

D A N K S A G U N G

An dieser Stelle sei mir gestattet, Herrn Professor Dr. Heinz Oeser, dem Direktor des Strahleninstitutes der Freien Universität Berlin im Städt. Krankenhaus Westend, für die freundliche Überlassung des Themas meinen besten Dank auszusprechen.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. Dr. Ernst Krokowski für die wertvolle Anregung und Hilfe sowie die Leitung dieser Arbeit.

Ebenso bin ich Frau A. Fielstecker, medizinisch-technische Assistentin im oben genannten Strahleninstitut für ihre liebenswerte Hilfe bei der praktischen Durchführung meiner Arbeit zu großem Dank verpflichtet.

L E B E N S L A U F

Am 20. April 1943 wurde ich als Tochter des Röntgen-
arztes Dr. med. Karl Steffens und seiner Ehefrau,
Dr. med. Dorothea Steffens geb. Hinz, in Berlin- Span-
dau geboren. Nach sechs Jahren Grundschule und sie-
ben Jahren Oberschule legte ich im April 1962 auf dem
Kant-Gymnasium Spandau das Abitur ab. Nach einem Se-
mester an der Pädagogischen Hochschule Berlin-Lankwitz
wechselte ich auf die Medizinische Fakultät und legte
in Berlin 1963 das Vorphysikum und 1965 das Physikum
ab. Es folgten ein Semester in Kiel und zwei Semester
in Zürich. Die restlichen Semester absolvierte ich
wieder in Berlin, wo ich im Sommer 1968 das Staatsex-
amen ablegte.

